限制性饮食者的食物奖赏调控缺陷：一项基于记忆抑制的 fMRI 研究

邹雨晴[1];梁蓉芳[1];敖华[1];高源[1];沈佳雯[1];高笑[1*]

（[1]西南大学心理学部 重庆 404100）

摘 要：

[目的] 本研究采用 Think/No-Think（TNT）范式结合功能磁共振成像(fMRI)技术，探讨限制饮食者食物记忆提取抑制及其奖赏贬值效应的认知机制和脑基础。

[方法] 40 名女性大学生被试（21 名限制性饮食者，19 名非限制性饮食者）参与实验。被试完成以食物图片和非食物图片为材料的 Think/No-Think（TNT）范式，其中 TNT 阶段在核磁共振扫描仪中进行，在 TNT 范式前后进行主观奖赏价值的测量。

[结果] 行为结果中并未观察到限制性饮食者对食物记忆提取抑制能力的降低或损伤，但提取抑制的奖赏贬值效应随限制性进食程度的增加而降低。脑成像结果显示，限制性饮食者在抑制食物关联的记忆时，表现出更强的 dlPFC 的激活和更弱的奖赏和记忆脑区的激活。此外，dlPFC 与记忆和奖赏脑区的连接强度随限制性进食得分的升高而减弱。进一步的分析表明，dlPFC 和丘脑的功能连接强度介导了限制性进食得分与奖赏贬值效应的负性变化关系。

[局限] 本研究的被试均为健康大学生。在年龄上，执行功能处于整个年龄段的高峰阶段，因此可能出现天花板效应。

[结论] 本研究揭示了限制性饮食者进行食物奖赏调控的抑制控制缺陷，为理解限制性饮食者自我调控失败而导致过强的食物奖赏动机和过度进食行为提供了支持目标冲突模型的证据。

关键词：限制性饮食者，目标冲突模型，记忆提取抑制，食物奖赏

分类号：

*通讯作者：高笑（gaoxiaox@swu.edu.cn）

本文系国家自然科学基金面上项目（项目编号：32071046）和重庆市自然科学基金（项目编号：cstc2020jcyj-msxmX1065)的研究成果之一

Deficits in food reward regulation of restrained eaters: a fMRI study based on memory inhibition

Zou Yuqing[1], Liang Rongfang[1], Ao Hua[1], Gao Yuan[1], Shen Jiawen[1], Gao Xiao[1*]

[1](Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract:

[Objective] The current study used the Think/No-Think paradigm combined with fMRI techniques to explore the cognitive and brain mechanisms of food memory retrieval inhibition and its reward devaluation effects among restrained eaters.

[Methods] Forty participants (all female) aged between 18-24 were recruited for this study, 21 of whom were restrained eaters and 19 were unrestrained eaters. Participants completed a food version TNT task, which consisted of learning phase, TNT phase and test phase. The TNT phase was completed in a 3.0T Siemens Prisma MRI scanner. Before and after the whole three phases of TNT task, participants rated the subjective value of the food items in the pictures.

[Results] Behavioral results revealed no significant differences in memory retrieval inhibition effect between restrained eaters and unrestrained eaters. However, restrained eating scores were negatively correlated with the effect of reward devaluation of inhibited food items. Neuroimaging data showed that restrained eaters had greater activation of dorsolateral prefrontal cortex (dlPFC) and lower activation of reward and memory areas than unrestrained eaters during inhibiting food-related memories. In addition, PPI analysis showed that the connectivity strength of dlPFC with hippocampus, parahippocampus, thalamus and posterior cingulate cortex were negatively corrected with restrained eating scores. Further analysis showed that connectivity strength between dlPFC and thalamic mediated the negative association between restrained eating scores and the reward devaluation effects of

memory inhibition.
[Limitations] The subjects in this study were all healthy university students whose performance in executive functioning was at its peak, therefore a ceiling effect may have occurred.
[Conclusion]The current observations support the goal conflict model from the perspective of memory retrieval inhibition, whereby restrained eater has difficulty in successfully regulating conflict between inhibition and food reward by devaluation food reward. This kind of deficiency in reward devaluation due to deficits in memory inhibition may further increase the risk of uncontrolled food intake in food-rich environments of restrained eaters.
Keywords: restrained eaters, goal conflict model, memory retrieval inhibition, food reward

1 前言

人们生活在“致胖”的饮食环境中。随着营养学和食品加工工业的发展，食物的风味越来越丰盈，总给人留下深刻而美好的记忆。随处可见可闻的美味食物线索，着实令人难以抗拒。“致胖”的饮食环境为健康维持与促进提出了新挑战。2020 年的《中国居民营养与慢性病状况报告》显示，我国成人超重率为 34.3%，肥胖率为 16.4%。按照绝对人口数来计算，全国 6 亿人口超重和肥胖，排名全球第一。如何平衡“江上往来人，但爱鲈鱼美”的美食渴望与“无肉令人瘦”的健康目标，不仅是当下民众关注和实践的议题，同时也是近三十年来心理学、神经科学、营养学、医学等相关领域研究者关注的热点科学问题。

限制性饮食者指长期关注体重和减肥的慢性节食者[1]。尽管他们努力地减少热量摄入，但仍会出现不受控制的进食行为。目标冲突模型提出，限制性饮食者面临两个互相冲突的目标，即享乐目标和体重控制目标[2]，两者的内在冲突是导致自我调节失败的关键机制[3]。为达成体重控制目标，限制性饮食者常常忽略机体的内稳态信号，导致他们对饥饿信号越来越迟钝，而更多依靠机体外部线索决定进食行为，例如食物气味、美食广告等。因此，相比非限制性饮食者，限制性饮食者对食物线索具有更高的敏感性和响应性[4]，从而诱发他们产生具有强烈的进食渴望，甚至出现过度进食或暴饮暴食行为，进而导致体重控制目标失败[5]。

目前，目标冲突模型得到了许多研究证据的支持。证据显示，限制性饮食者通常表现出较差的抑制控制能力。例如，在停止信号(Stop Signal)任务中，限制性饮食者普遍比非限制性饮食者有更高的停止信号反应时(Stop Signal Reaction Time，SSRT)和更低的停止信号延迟(Stop Signal Delay, SSD)[6]。在食物 Go/No-go 任务中，限制性饮食者对食物 No-go trial 的反应时比非限制性饮食者更长[7]。脑功能研究显示，限制性饮食者在停止信号任务中的 SSRT 和背外侧前额叶的 ReHo 值呈负相关[8]；在食物 Go/No-go 任务中，限制性饮食者在食物 No-go trial 中额叶 N2a 的神经反应强度比非限制性饮食者更低[9]；限制性饮食者相比非限制性饮食者背外侧前额叶与后扣带回之间的静息态功能连接更弱[10]。

除此之外，个体能否成功调控与食物和进食关联的想法对食欲的产生和进食行为亦十分关键。例如，当食欲被甜品店传出的香气所勾起时，能否抑制那一口丝滑香甜的巧克力蛋糕萦绕于心的记忆，对于下一刻你将踏进甜品店或转身离开至关重要。前人研究发现，过度进食或暴饮暴食者对食物相关记忆的抑制能力降低。例如，肥胖的限制性饮食者在对食物相关的想法进行抑制之后，反而会出现更多与食物关联的记忆侵入[11]。限制性饮食者依赖于外部线索，可能使得他们在面对食物线索时难以抑制食物相关记忆的入侵[12]。然而，对限制性饮食者食物关联记忆的自我调控的研究却较为缺乏。

Anderson 等人[13]创制了 Think/No-Think (TNT)范式以研究记忆提取的自我调控。被试首先进行线索-目标配对的学习，然后执行记忆提取或抑制提取的认知操作，最后回忆所有学习过的材料，通过比较提取、抑制和基线的记忆正确率来衡量提取抑制效果。当抑制条件的回忆率低于基线条件则意味着提取抑制导致记忆受损或遗忘，即产生提取抑制效应 [14]。大量研究均一致发现，反复的抑制记忆提取，能够使机体主动遗忘[13, 15]或减少记忆的侵入[16]。Anderson 等人进一步揭示了记忆抑制的大脑基础。这一过程涉及前额叶控制区域(特别是右侧背外侧前额叶皮层)自上而下地抑制海马的活动[17]。具体表现为，海马在记忆抑制

条件下的激活显著低于提取条件下的激活[18]，并且海马活动的减少能够预测记忆的遗忘[19]。研究者还观察到与神经抑制网络参与相关的抑制能力的个体差异，即记忆侵入率低的个体，抑制网络中的额顶叶与海马体和杏仁核之间有更强的耦合[20]。

近几年，研究者对食物词汇、食物图片等食物相关的记忆内容的提取抑制进行了探索性研究。这些研究发现，食物相关的记忆在正常体重的健康个体中能够通过反复的提取抑制从而被遗忘[21, 22]。尽管反应抑制的研究已经普遍揭示了限制性饮食者的抑制缺陷，但是目前仅检索到一篇针对限制性饮食者的记忆抑制的 ERP 研究[23]。该研究发现了抑制条件与提取条件的回忆率差异，但并未观察到抑制条件与基线的差异。另外，与知觉控制条件相比，记忆抑制条件下的 P2 更大，代表了任务涉及的认知资源以及任务相关刺激引发的选择性注意增强。但是由于 ERP 技术的低空间分辨率，不能精确定位大脑，且研究未对比限制性饮食者与非限制性饮食者，因此，未能解答限制性饮食者是否存在记忆抑制缺陷，本研究试图通过纳入群体及材料的对比，采用 fMRI 技术，探究限制性饮食者是否具有食物特异性的记忆抑制缺陷及其脑基础。

另一个尚待回答的问题是，对食物线索的记忆抑制有什么作用功能呢？前人研究发现，抑制控制训练能够产生奖赏贬值效应，即下调奖励敏感性或奖赏价值[24]。例如，基于运动抑制训练(Go/No-go 和 Stop Signal 任务)的研究发现，在健康个体中，对食物刺激的反应抑制能产生贬值效应，即下调对食物线索的奖赏价值评价[25]，并且能够减少未来对该类食物的摄入[26-28]。训练产生的奖赏贬值效应在限制性饮食个体中也被观察到。具体而言，对食物线索的反应抑制训练能够降低限制性饮食者对其喜爱度评定、选择频率[29]或摄入量[30]。但是，目前仅检索到一篇文献探讨记忆抑制的奖赏贬值效应。研究采用 TNT 范式探讨了食物记忆的提取抑制对后续主观奖赏价值(Liking 和 Wanting 评定)的影响。结果发现，记忆提取抑制可以下调对食物的渴望评定[21]。目前还没有研究探讨记忆抑制的贬值效应在限制性饮食者群体中是否仍然有效，且贬值效应的脑基础亦不清楚。

综上，本研究采用 Think/No-Think 范式结合功能性磁共振成像技术(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)扫描，探讨限制性饮食者的食物记忆提取抑制及奖赏贬值的认知与脑机制。在 TNT 任务中，被试分别学习食物和非食物图片与中性词汇的配对；接下来，被试进行记忆提取或抑制提取的认知操作，同时进行 fMRI 脑部扫描；在最后的测试阶段，对所有学习的材料进行回忆。同时，被试在实验前后对食物图片的主观奖赏(喜爱度和渴望度)进行评定。本研究假设，(1)反复地抑制提取能产生提取抑制效应，其行为表现为 No-think 条件项目的回忆率显著低于 Think 和 Baseline 条件，其大脑基础为 No-think vs. Think 条件下，背外侧前额叶的激活增强且海马的激活减弱；同时，我们假设，食物奖赏脑区的活动在记忆抑制时亦会激活减弱；(2)提取抑制可以产生奖赏贬值效应，即实验前后 No-think 条件中的食物渴望度和喜爱度的下降幅度大于 Think 和 Baseline 条件；(3)与非限制性饮食者相比，限制性饮食者对食物相关的记忆抑制能力下降，即在行为结果中表现为更小的提取抑制效应，其脑基础可能为 No-think vs. Think 条件下抑制控制脑区的激活不足，或抑制控制脑区对海马和奖赏脑区的调控减弱。另外，本研究进一步探讨了奖赏贬值效应在两组中可能存在的差异，及其相应的脑机制。

2 方法

2.1 被试

本研究招募 40 名某大学在校大学生为被试，均为女性。被试年龄在 17-24 岁(平均年龄 19.03 ± 1.40)。平均身体质量指数为 23.21 ± 2.97 kg/m^2。根据荷兰饮食行为问卷(Dutch eating behavior questionnaire，DEBQ)对被试的限制性进食行为情况进行调查，在 DEBQ 的限制性进食(RS)维度中得分大于或等于 3 分的作为限制性进食组，有 21 人；小于 3 分的为非限制性进食组，有 19 人。所有被试视力正常或矫正正常，无色盲色弱，无学习或注意障碍，未服用精神药物，无酗酒酗烟史，均自愿参加实验。实验前被试被告知磁共振实验注意事项，并签署知情同意书。实验结束后，被试均获得相应报酬。

2.2 材料

实验材料为 72 组“词汇-图片”的配对。其中，词汇全部为中性词汇；图片分为中性图片和食物图片，各 36 张。中性图片为常见的日常用品，食物图片选自德国的食物图片库[31]和中国食物图片库[32]，均为高脂高糖的食物。图片统一处理背景和亮度，尺寸大小均为 200 × 160 像素。所有配对的词汇和图片之间都没有明显相关，避免产生联想。每种条件(分别为“提取”、“抑制”和“基线”)下纳入 10 组“词汇-中性图片”配对和 10 组“词汇-食物图片”配对，并分为三组进行平衡，使他们在被试间每种条件下出现的概率相同。剩余 12 组配对用于磁共振机器外的练习，以确保被试进入扫描时掌握实验。

2.3 研究工具

人口统计学变量。人口统计学变量包括被试的年龄，性别，药物使用情况，吸烟和饮酒史以及月经周期。

荷兰饮食行为问卷(Dutch Eating Behaviour Questionnaire，DEBQ)。采用 Strien, Frijters [33]编制的问卷，该问卷测量三种饮食行为：限制性饮食、情绪性饮食和外部性饮食。问卷共包含 33 题，其中限制性饮食分量表与外部性饮食分量表各包含 10 道题，情绪性进食分量表包含 13 道题。各分量表的平均得分越高，则表明其对应的饮食行为出现频率越高。问卷为 5 点评分，1 = 从不，5 = 总是。

积极情绪消极情绪量表(Positive Affect and Negative Affect，PANAS)。采用 Watson(1980)等人编制的问卷，该问卷分为两个情绪量表，分别是积极情绪和消极情绪，各有 10 个描述不同情绪和感受的词组组成。分数越低表示积极/消极情绪水平越低，分数越高表示积极/消极情绪水平越高。量表采用 5 点评分，1 = 几乎没有，5 = 极其多。

食物的主观奖赏价值评定。对所有食物图片依次分别进行 Liking 和 Wanting 的评分，采用 5 点自评量表，报告当前该食物材料 Liking(“你现在有多喜欢该食物”)和 Wanting(“你现在有多想吃该食物”)。1 = 一点都不，5 = 非常。

内稳态评定。饥饿度和饱腹感的评定采用 5 点自评量表，评定饥饿程度(“你现在觉得饿吗？”)和饱腹程度(“你现在觉得饱吗？”)。1 = 一点都不，5 = 非常。

2.4 实验程序

所有被试被要求在实验前一小时内不能进食，以保证饥饿状态是不饱不饿。抵达实验室后，被试先使用医学身体成分分析仪(M515，Seca，Hamburg, Germany)采集身体成分，填写 DEBQ 和 PANAS，进行主观奖赏价值的评定和内稳态评定。

接着进入 Think/No-Think 实验，共包括三个阶段。第一阶段为学习阶段。被试对“中性词汇-食物/中性图片”的配对进行学习和测试。被试先学习前 36 组配对，包括 18 组中性词汇-中性图片和 18 组中性词汇-食物图片配对。学习完成

后，进行测试：屏幕上仅出现先前学习过的词汇，要求被试在三张图片(一张为正确配对图片，另两张为其他配对中的图片)中选择对应的图片。选择后无论正确与否都将出现正确答案以巩固记忆。前 36 对配对的正确率达到 90%以上，则进行后 36 组配对的学习和测试。如未达到 90%的正确率则再次进行测试。最多只有两次测试的机会。在 72 组配对分为两组完成学习和测试后，对所有配对进行测试，正确率达到 80%以上的被试可以进入下一阶段。

第二阶段为 TNT 阶段，在扫描仪内进行。这个阶段两个实验条件，即记忆提取和提取抑制。在记忆提取条件下，第一阶段学习过的词汇以绿色呈现，要求被试尽快回想词汇对应的图片，并将其保留在脑海中，直到提示词消失；在提取抑制条件下，词汇呈现为红色，被试需要阻止相应的图片出现在脑海中，并且不能用其他的想法或者思维进行替换。TNT 实验中基线条件的图片在该阶段不呈现。被试首先对 12 组练习材料进行练习，然后对第一阶段学习过的所有配对进行简短的重现(每个配对 1.5s)，以此再次加强被试的记忆。在练习和重现后，被试进入核磁共振扫描仪进行第二阶段的任务并同时进行 fMRI 扫描。本阶段共包括 4 个 run，每个 run 最初呈现 10 秒的“＋”注视点，以确保被试的生理信号达到平稳值；随后呈现 80 个 trial，即 20 个提取(10 个中性和 10 个食物)和 20 个抑制的刺激的两次重复以伪随机顺序呈现，使得每个项目的两次重复之间至少间隔三个 trial。每个 trial 都呈现 4 秒的提示词汇，刺激之间的间隔在 1000ms-5000ms 之间变化(1000ms，3000ms，5000ms)。每个 run 的运行时间在 10 分钟左右。

第三阶段为记忆测试阶段，在扫描仪外进行。被试对再次对第一阶段所有配对进行回忆。在这一阶段，提取、抑制和基线的提示词随机呈现在屏幕上，直至被试报告后自行按键跳至下一提示词。在此期间，被试需要对提示词对应的图片根据五个维度进行口头报告和特征描述。如果被试报告为食物，则需从食物图片的“命名”、“颜色”、“形状”、“数量”、“容器”五个维度进行描述；如果被试报告为非食物，五个维度为“命名”、“颜色”、“形状”、“数量”、“材质”。被试的报告内容进行录音，并由两位评分者进行独立评分。当三个及以上的维度正确时，可记为记住。如两位评分者判断不一致，则由第三位评分者进行判断并以第三位评分者的判断为准。

在三个阶段实验结束后，再次对所有食物图片进行 Liking 和 Wanting 的评定。

2.5 fMRI 数据采集

实验数据使用西门子公司的 3T 超导型磁共振成像系统(3T Siemens Trio Tim scanner)获得。对于功能像扫描，使用全脑平面梯度回波成像序列(gradient-echo echo planar imaging，EPI)进行扫描，具体参数如下：重复时间(repetition time，TR) = 2000ms，回波时间(echo time，TE) = 30ms，射频翻转角(flip angle) = 90°，扫描视野(field-of view，FOV) = 224mm，体素大小(voxel size) = $2.0 \times 2.0 \times 2.0mm^3$，扫描矩阵(matrix)= 64×64，层数(Slices) = 62，层厚(slice thickness)= 2mm。对于结构像扫描,采用磁化强度预备快速梯度回波序列(MPRAGE sequence)，其参数为：TR = 2530ms，TE = 2.98ms，体素大小= $0.5 \times 0.5 \times 1.0mm^3$，FOV = 256mm，层厚 = 1mm。

2.6 fMRI 数据预处理

数据采用 spm12 软件进行数据预处理。为了提高磁场均匀性和排除被试对核磁环境的适应过程，剔除每个扫描模块的前 5 张图像。对每个被试的 fMRI 数据进行时间层校正，头动校正和空间调整。随后将图像标准化到 MNI(Montreal

neurological institute)标准空间模板，标准化后的体素大小为 3 × 3 × 3 mm^3 体素大小，然后进行 6mm 的高斯平滑处理。

2.7 数据分析

（1） 行为数据分析

行为数据主要采用 SPSS 25 进行统计分析。对 Think/No-Think 任务中测试阶段回忆进行 2(实验材料：中性图片 vs. 食物图片) × 3(实验条件：Think, No-think vs. Baseline) × 2(分组：限制性进食组 vs. 非限制性进食组)的重复测量方差分析，因变量为回忆率。回忆率基于学习阶段记住的配对，即回忆正确的个数/学习阶段学会的个数[13]。

对主观奖赏价值(Liking、Wanting)评分进行 2(时间：实验前 vs. 实验后)× 3(实验条件：Think, No-think vs. Baseline) × 2(分组：限制性进食组 vs.非限制性进食组)的重复测量方差分析，因变量为 Liking 和 Wanting 的评分。

（2） fMRI 数据分析

一般线性模型。在个体水平，采用一般线性模型(the general linear model，GLM)构建多重线性回归模型矩阵。矩阵包括四种事件条件类型，分别是：食物-提取(F-T)、食物-抑制(F-NT)、中性-提取(N-T)、中性-抑制(N-NT)。采用经典血动力反应函数(HRF)及其时差导数(temporal devatives，TD)进行卷积。此外，为去除头动对数据的影响，利用伪影检测工具(Artifact Detection tools，ART；http://www.nitrc.org/projects/artifact_detect)进行进一步的头动伪影检测和校正。然后使用 128s 的高通滤波函数去掉低频噪音。

采用 GLM 分析得到的 contrast images 进行组分析。采用以下统计检验：探究食物和中性图片的记忆抑制的脑区激活模式：F-NT > F-T，N-NT > N-T；探究限制性进食组和非限制性进食组在抑制食物和中性图片时的不同激活模式，采用独立样本 t 检验比较 F-NT > F-T 和 N-NT > N-T 的两组对比图像。统计检验阈值为 $p < 0.05$ (基于峰值，Family wise error 校正)且连续激活体素大于 3 的区域。

兴趣区(region of interest, ROI)分析。根据前人文献和本研究假设，我们选取了抑制控制脑区、记忆脑区和奖赏脑区作为兴趣区(以 wfu 软件包中 AAL 模板作为 mask)。其中抑制控制脑区包括双侧扣带回[34]；记忆脑区包括双侧海马、双侧颞叶；对食物线索产生反应性的奖赏脑区包括双侧杏仁核、双侧眶额叶、双侧尾状核、双侧壳核、双侧苍白球、双侧后扣带回、双侧脑岛、双侧岛盖、双侧梭状回、双侧海马旁回、双侧丘脑 [35]。

心理生理交互(psychologysiological interaction，PPI)分析。为了探究食物图片进行记忆抑制时的功能连接情况，进一步进行了心理生理交互分析[36]。种子点的定义为：以两组在食物图片的记忆抑制时的激活存在显著差异的脑区峰值坐标为球心，以 6mm 为半径的立体小球。PPI 分析考察了对比抑制条件和提取条件下，提取条件或抑制条件种子点与全脑其他区域的连接强度。在个体水平上建立的 PPI 一般线性模型(GLM)包括心理项、生理项和生理心理交互项，进一步将所有单个的生理心理交互变量纳入后续的组水平分析。功能连接分析阈值为 $p < 0.05$ (基于峰值，Family wise error 校正)且连续激活体素大于 3。。通过以 3mm 为半径提取显著功能连接的 PPI beta 值，用于衡量种子点和耦合区域之间的功能连接强度，用于中介分析。中介分析使用 SPSS 中的 PROCESS 宏程序进行[37]。本研究的 fMRI 分析在 SPM12 中进行。

3 结果

3.1 人口学变量

使用独立样本 t 检验对两组被试的人口学变量进行差异检验，结果如表 1 所示，仅限制性进食维度得分在两组中存在着显著差异，$t(38)= 7.84$，$p < 0.001$, Cohen’s d = 2.54。

3.2 Think/No-Think 任务行为结果

对 Think/No-Think 任务中测试阶段回忆正确率进行 2(实验材料：中性图片 vs. 食物图片)× 3(实验条件：Think, No-think vs. Baseline) × 2(分组：限制性进食组 vs. 非限制性进食组)进行重复测量方差分析。结果显示，实验材料的主效应显著，$F(1, 38)= 21.56$，$p < 0.001$，偏 $\eta^2 = 0.36$，食物图片的回忆率(0.83 ± 0.02)比中性图片更低(0.89 ± 0.02)。实验条件的主效应显著，$F(2, 76)= 7.59$，$p = 0.001$，偏 $\eta^2 = 0.17$。事后检验显示，抑制条件的回忆率(0.82 ± 0.03)显著低于回忆条件(0.89 ± 0.02，$p = 0.004$)和基线条件(0.88 ± 0.02，$p = 0.033$)。回忆条件与基线条件之间的回忆率没有显著差异，$p = 0.954$。分组的主效应不显著，所有交互作用均不显著 ($ps > 0.05$，图 1A、B)。

对喜爱度进行 2(时间：实验前 vs. 实验后)× 3(实验条件：Think, No-think vs. Baseline)× 2(分组：限制性进食组 vs.非限制性进食组)的重复测量方差分析显示，时间的主效应显著，$F(1，38)= 6.59$，$p = 0.014$，偏 $\eta^2 = 0.15$，被试在后测的喜爱度(3.21 ± 0.72)评分低于前测(3.33 ± 0.71)。实验条件和分组的主效应及交互作用均不显著($ps > 0.05$)。对渴望度的分析结果显示，时间、实验条件和分组的主效应均不显著，交互作用均不显著($ps > 0.05$)。

表 1 本研究两组被试的人口学特征($M \pm SD$)

变量	限制性进食组（n=21）	非限制性进食组（n=19）	差异检验
BMI	23.89 ± 2.97	22.47 ± 2.87	t = 1.54
年龄(岁)	19.24 ± 1.79	18.79 ± 0.79	t = 1.01
DEBQ-RS	3.69 ± 0.53	2.52 ± 0.39	t = 7.84***
DEBQ-EM	2.33 ± 0.73	2.68 ± 0.77	t = -1.48
DEBQ-EX	3.77 ± 0.37	3.88 ± 0.40	t = -0.88
PANAS-PA	28.10 ± 4.68	29.42 ± 4.74	t = 0.89
PANAS-NA	20.29 ± 7.09	19.37 ± 5.39	t = 0.46
饥饿度-前测	1.76 ± 0.94	2.00 ± 1.05	t = 0.75
饱食度-前测	2.00 ± 1.14	2.37 ± 1.17	t = 1.01
饥饿度-后测	3.05 ± 1.24	3.37 ± 1.34	t = 0.79
饱食度-后测	1.29 ± 0.72	1.63 ± 0.76	t = 1.48
学习阶段的正确率	0.98 ± 0.02	0.98 ± 0.30	t = 0.37

注：BMI = 身体质量指数；DEBQ-RS = 限制性饮食；DEBQ-EM = 情绪性饮食；DEBQ-EX = 外部性饮食；PANAS-PA = 积极情绪；PANAS-NA = 消极情绪；

*** $p \leqslant 0.001$

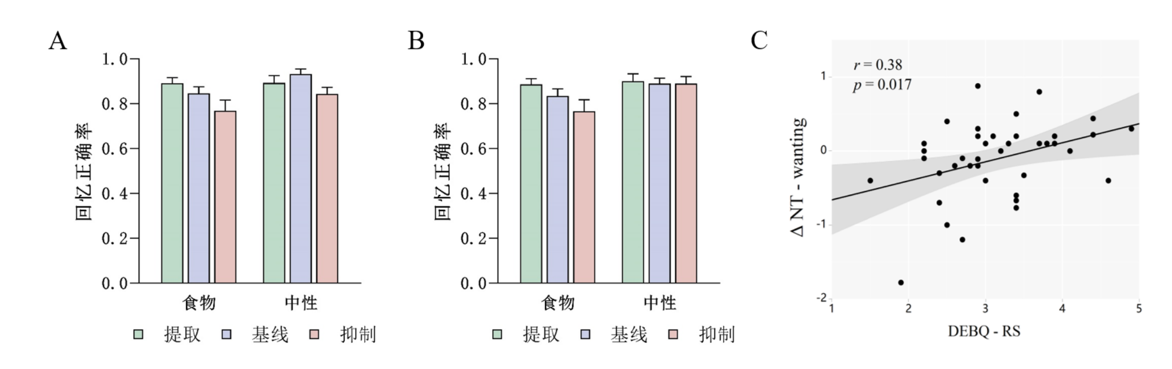


图 1 行为实验结果。A.限制性进食组在各个条件下的回忆率；B.非限制性进食组在各个条件下的回忆率。图中的误差条表示均值的标准差。C. 限制性进食分数与抑制条件下渴望度的变化量的相关

为了进一步探查限制性进食程度与记忆抑制能力的关联，将限制性进食分数(DEBQ-RS)分别与食物和中性的记提取抑制效应(提取抑制效应 = 基线条件正确率 – 抑制条件正确率)进行相关分析，均无显著结果。

为了探查限制性进食程度与奖赏贬值效应的关联，将限制性进食分数与各个条件下喜爱度和渴望度的变化量(变化量 = 后测 – 前测)进行相关分析。结果(如图 1C)显示，限制性进食得分和抑制条件下渴望度的变化量呈正相关，$r = 0.38$，$p = 0.017$，即限制性进食的分数越高，提取抑制对渴望度的下调越小。

3.3 fMRI 结果

（1） 记忆抑制的大脑激活

分别在两组被试中对食物和中性图片 NT vs. T 进行单样本 t 检验。结果发现，限制性饮食者在食物 NT vs. T contrast 中，额上回、额下回、颞上回、岛盖、眶额叶和左侧脑岛有更强的激活，扣带回、杏仁核、尾状核、梭状回、海马、右侧脑岛、岛盖、海马旁回、楔前叶和颞下回激活减弱。在中性 NT vs. T contrast 中，顶上小叶、额中回和颞下回激活更强，颞上回、颞下回、前扣带回、中扣带回、后扣带回、梭状回、海马、脑岛、海马旁回和丘脑激活更弱(表 2，图 2)。

非限制性进食组在食物 NT vs. T 的对比中，额上回、额中回、额下回、中扣带回和岛盖有更强的激活，楔前叶、中扣带回、后扣带回、杏仁核、梭状回和海马旁回激活减弱。在中性 NT vs. T 的对比中，额上回、额中回、额下回、辅助运动区、梭状回和岛盖激活更强，后扣带回、杏仁核和脑岛激活更弱(表 2，图 2)。

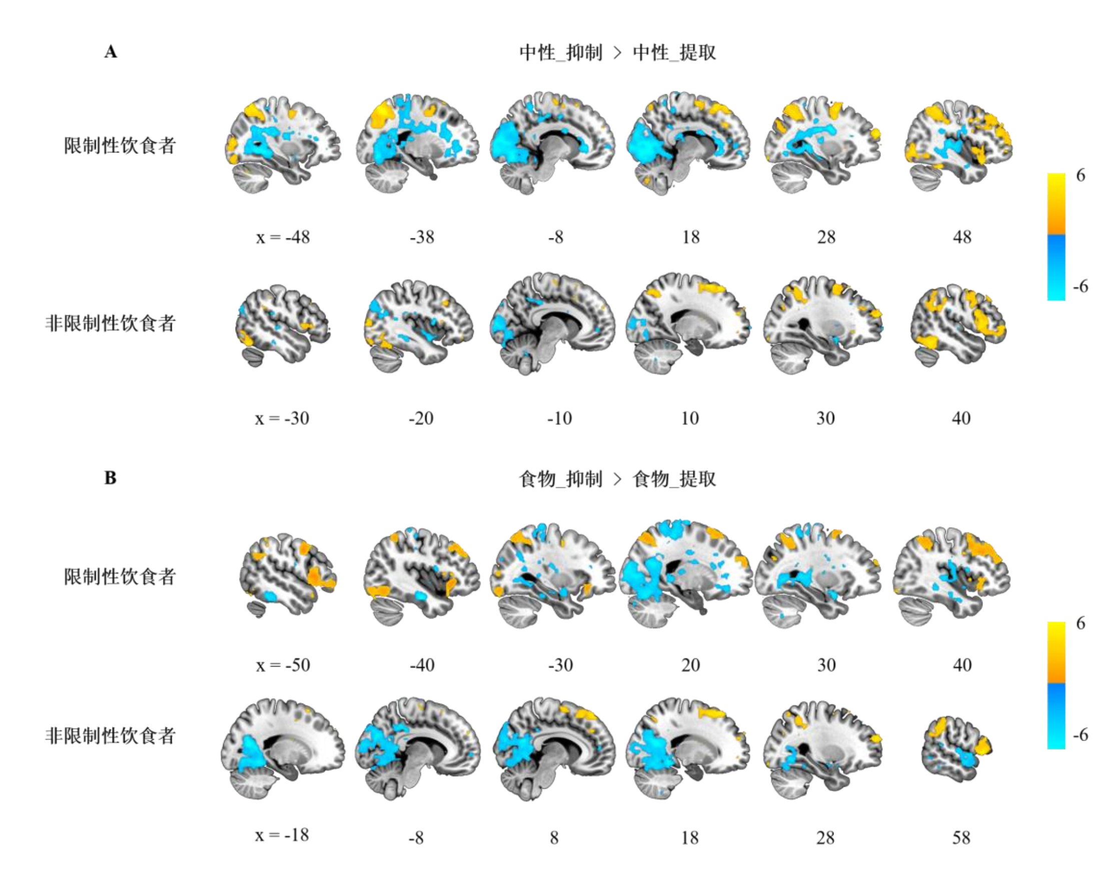


图 2 限制性饮食者和非限制性饮食者抑制食物和中性刺激时的大脑活动。图中显示阈值为未校正 $p<0.005$，最小簇大小为 3 体素的脑区；A.抑制食物刺激；B.抑制中性刺激

表 2 抑制中性和食物刺激时的大脑激活

大脑区域	半球	团簇大小	MNI 坐标 X	Y	Z	*t* 值
限制性进食组						
食物抑制 ＞ 食物提取						
ROI 分析						
眶额叶	L	353	-28	26	-10	5.83
	L		-38	22	-4	5.40
脑岛	L	142	-38	20	-4	5.02
岛盖	L	363	-50	14	6	5.42
	R	329	50	16	6	5.02
颞上回	R	59	60	-52	22	5.39
额下回	L	380	-38	24	-2	5.67
	L		-52	18	4	5.64
额中回	R	1088	48	16	44	6.11
	R		46	24	38	5.58
食物抑制 ＜ 食物提取						
ROI 分析						
前扣带回	R	45	6	10	28	6.28
	R	17	10	34	-2	5.52
中扣带回	L	245	-10	-32	38	6.35
	L		-10	-28	46	5.28
	L	114	-12	-10	42	5.17
	R	89	4	6	30	5.05
后扣带回	R	20	8	-42	16	4.90
杏仁核	R	47	30	2	-18	6.16
	L	23	-28	-2	-18	5.03
尾状核	R	9	22	18	16	5.18
	L	41	-18	-6	20	5.04
梭状回	L	115	-36	-18	-22	7.07
	R	138	20	-62	-14	5.25
海马	L	62	-36	-18	-20	7.07
	R	230	30	-38	4	5.33
	R		18	-34	2	5.00
	R		38	-34	-10	4.68
	L	53	-24	-34	0	5.05
脑岛	R	24	38	6	14	6.02
岛盖	R	5	40	6	14	4.86
旁海马	L	15	-34	-46	-8	5.18
颞下回	L	48	-42	-16	-22	6.85
中性抑制 ＞ 中性提取						

全脑分析						
顶上小叶	L	1546	-22	-66	52	8.23
ROI						
梭状回	R	73	40	-40	-26	6.16
	R	39	48	-64	-18	5.17
颞下回	R	493	48	-60	-12	6.06
额中回	R	342	50	18	42	5.91
中性抑制 < 中性提取						
全脑分析						
前扣带回	L	22638	-4	26	-4	9.57
舌回	L		-16	-76	-10	8.62
楔叶	R		10	-74	8	7.76
楔叶	L		-4	-90	18	7.73
舌回	L		-4	-92	-8	7.55
前扣带回	R		6	26	-2	7.49
旁海马	L		-32	-44	-4	7.37
舌回	R		14	-82	-6	7.28
旁海马	L		-30	-52	-2	7.28
枕叶			0	-80	6	7.26
	R		28	-6	28	7.23
前扣带回	L		-16	28	22	7.12
ROI						
中扣带回	L	141	-16	-32	42	6.03
	L		-12	-24	46	5.73
	R	36	18	-26	44	5.95
后扣带回	R	6	16	-42	10	4.66
梭状回	R	124	24	-72	-6	7.02
	L	48	-30	-54	-4	6.59
	L	87	-38	-22	-18	5.83
	L		-36	-30	-16	5.53
	R	38	32	-46	-4	5.76
海马	L	195	-30	-36	-6	5.35
	L		-34	-10	-22	4.92
	L		-36	-20	-18	4.68
	R	201	30	-36	2	5.05
脑岛	L	231	-32	-28	22	5.60
	L		-32	-14	18	5.31
旁海马	L	86	-32	-44	-4	7.37
	R	19	32	-44	-4	5.18
颞下回	L	42	-36	-32	-14	5.66
颞上回	R	322	38	-30	10	5.38
	L	708	-64	-18	8	5.37
	L		-46	-28	6	5.31

丘脑	R	24	6	-24	12	5.38
非限制性进食组						
食物抑制 > 食物提取						
ROI 分析						
中扣带回	R	31	10	38	34	5.59
岛盖	R	304	60	16	4	5.86
	R		54	16	16	5.37
额下回	R	406	58	20	4	6.10
额中回	R	375	30	60	22	6.44
额上回	L	40	-16	18	62	6.43
	R	353	14	26	60	6.00
食物抑制 < 食物提取						
全脑分析						
楔前叶	L	8682	-14	-68	18	8.68
	L		-18	-64	14	7.81
ROI						
中扣带回	L	212	-8	-40	40	5.80
后扣带回	L	3	-8	-44	10	4.77
杏仁核	R	6	34	4	-20	4.11
梭状回	L	192	-16	-46	-12	5.95
	R	239	28	-62	-4	5.37
旁海马	R	41	18	-42	-10	5.35
	R	20	34	-18	-26	5.28
中性抑制 > 中性提取						
全脑分析						
辅助运动区	R	2762	2	14	62	7.86
ROI 分析						
梭状回	L	101	-46	-64	-20	6.52
岛盖	R	517	52	18	12	7.39
	R		60	18	6	6.34
	R		46	10	22	5.18
额下回	R	234	48	18	4	5.35
额中回	R	372	36	34	40	6.36
额上回	R	294	18	12	62	5.93
中性抑制 < 中性提取						
ROI 分析						
后扣带回	L	39	-4	-50	20	4.49
杏仁核	R	14	28	2	-14	4.53
脑岛	L	115	-42	-10	-2	5.76

	L	-38	-2	-12	5.74
	L	-36	8	14	5.28

（2）奖赏贬值效应的大脑机制

为了探查奖赏贬值效应在大脑激活中的表现，在限制性饮食者与非限制性饮食者中分别对抑制条件下渴望度的变化量与食物 NT vs. T contrast 进行相关分析，结果均未发现脑区与渴望度的变化量存在相关关系。

（3）记忆抑制大脑激活的组间差异

通过独立样本 t 检验，探讨限制性进食组和非限制性进食组的激活差异。结果显示，在抑制食物刺激时，两组的大脑激活存在显著差异。限制性进食组的背外侧前额叶的激活强于非限制性进食组。但是，右侧海马、右侧尾状核和双侧丘脑的激活比非限制性进食组更低。在抑制中性刺激时，限制性进食组的杏仁核的激活强于非限制性进食组(图 3，表 3)。

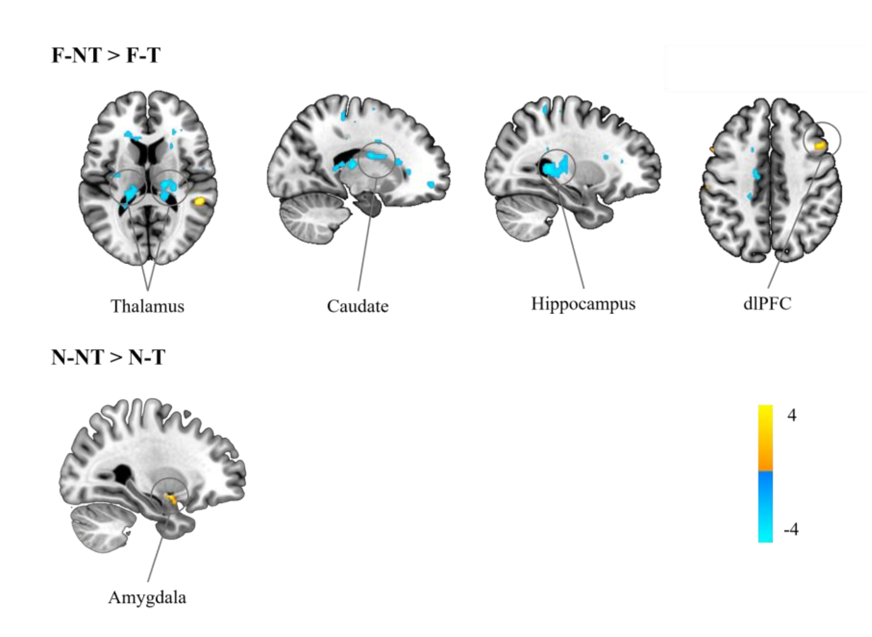


图 3 限制性进食组和非限制性进食组的激活差异。图中显示阈值为未校正 $p<0.005$，最小簇大小为 3 体素的脑区；黄色代表限制性进食组 > 非限制性进食组的激活，蓝色代表非限制性进食组 > 限制性进食组的激活；Thalamus = 丘脑；Caudate = 尾状核；Hippocampus = 海马；dlPFC = 背外侧前额叶；Amygdala = 杏仁核

表 3 限制性进食组和非限制性进食组的激活差异(ROI 分析)

大脑区域	半球	团簇大小	MNI 坐标 X	MNI 坐标 Y	MNI 坐标 Z	t 值
食物抑制 > 食物提取						
非限制性饮食者 > 限制性饮食者						
尾状核 [a]	R	59	18	-4	22	4.44
海马 [a]	R	84	28	-38	6	4.60
丘脑 [a]	R	79	18	-22	12	4.63

	L	52	-12	-28	14	4.00
限制性饮食者 > 非限制性饮食者						
dlPFC[b]	R	28	46	14	42	3.43
中性抑制 > 中性提取						
限制性饮食者 > 非限制性饮食者						
杏仁核[a]	R	13	28	-2	-12	3.64

a. 基于 WFU pickup atlas 中 aal 结构模板进行的 ROI 分析；

b. 基于前人文献中结果峰值进行的 small volume 分析

（4） 脑功能连接与限制性进食得分的相关关系

将在食物抑制 > 食物提取中在组间存在差异的背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, dlPFC)作为球心(表 3 中 dlPFC 峰值 MNI 坐标的 x, y, z = 46，14，42)，以 3mm 为半径的球体作为 PPI 分析的种子点。将限制性进食得分与以 dlPFC 为种子点的功能连接进行相关分析，结果发现在 dlPFC 和右侧丘脑、右侧海马、右侧后扣带回和左侧海马旁回的连接强度随着限制性进食得分的升高而减弱(图 4，表 4)。

表 4 与限制性进食得分存在相关关系的功能连接

大脑区域	半球	团簇大小	MNI 坐标 X	Y	Z	*t* 值
负相关						
全脑分析						
丘脑	R	128	10	-28	4	6.06
ROI 分析						
海马	R	29	24	-40	4	4.28
旁海马	L	6	-28	-44	-4	4.28
后扣带回	R	17	8	-44	20	4.40
丘脑	R	33	10	-28	4	6.06
	R	44	18	-12	16	4.56
			10	-20	16	4.10

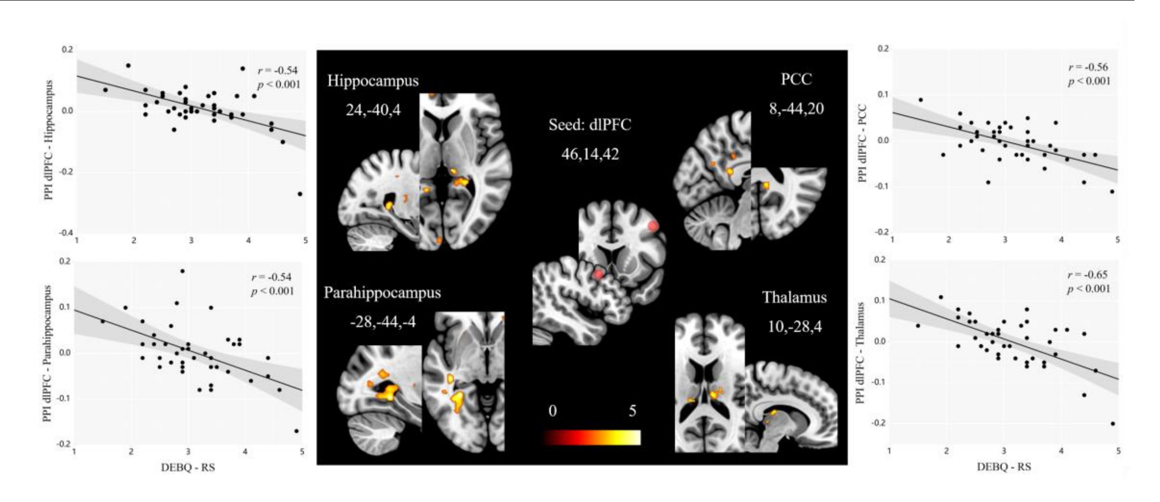


图 4 与限制性进食得分呈负相关的背外侧前额叶的功能连接。dlPFC = 背外侧前额叶；Hippocampus = 海马；Parahippocampus = 海马旁回；PCC = 后扣带回；Thalamus = 丘脑；DEBQ - RS = 限制性进食得分

（5） dlPFC 功能连接的中介作用检验

为了进一步回答“为什么限制性进食的分数越高，提取抑制对渴望度的下调越小”，揭示其神经活动基础，进一步对 dlPFC 的激活及其功能连接特征可能介导的中介作用进行了统计检验。提取了与限制性进食得分相关的各个脑区(丘脑、海马、海马旁回、后扣带回)的功能连接的 PPI beta 值，探究它们在限制性进食与抑制食物的渴望度变化上的中介效应。在样本选择为 5000 次，95%的置信区间条件下，进行 bootstrap 分析。结果仅显示背外侧前额叶和丘脑(MNI=10，-20，-16)的功能连接存在中介效应，间接中介效应是显著正向的($a \times b = 0.11$, 95% CI [0.01,0.23])。限制性进食分数对背外侧前额叶和丘脑的功能连接有着负向影响，$a = -0.05$; $t(38) = -3.82$, $p < 0.001$，背外侧前额叶和丘脑的功能连强度对提取抑制所导致的食物渴望度变化有着显著的负向影响，$b = -2.11$, $t(37) = -1.72$, $p = 0.094$。限制性进食分数对抑制的食物的渴望度变化直接影响不显著，$c' = 0.15$, $t(37) = 1.28$, $p = 0.210$。综上，背外侧前额叶-丘脑的连接强度起着显著的中介作用(图 5)，介导了记忆提取抑制对食物渴望度的下调效应随限制性进食程度的提高而降低的机制。

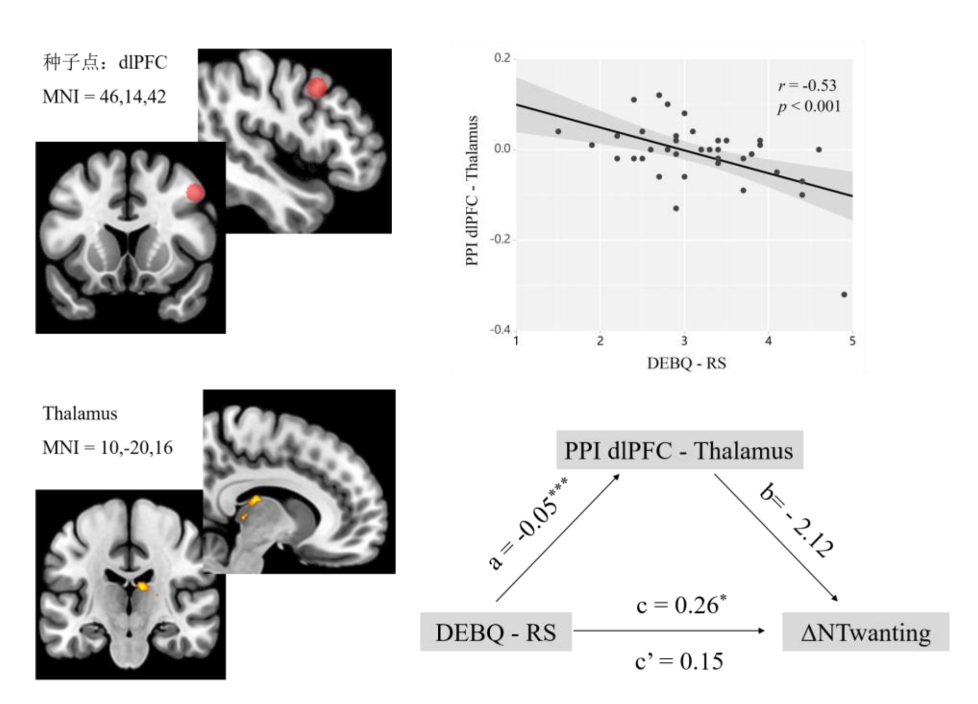


图 5 背外侧前额叶-丘脑的连接强度在限制性进食和抑制食物的渴望度变化间的中介作用。DlPFC = 背外侧前额叶；Thalamus = 丘脑；DEBQ-RS = 限制性进食得分；ΔNTwanting = 渴望度变化量；a = 限制性进食得分对背外侧前额叶-丘脑的连接强度的影响；b = 背外侧前额叶-丘脑的连接强度对抑制食物的渴望度变化的影响

4 讨论

对食物线索关联的抑制控制能力减弱甚至损伤，是导致限制性饮食者过度进食和暴饮暴食的重要风险因素之一。本研究采用 Think/No-Think 范式探讨了限制性饮食者的食物线索关联的记忆提取抑制能力及其奖赏贬值效应的差异及神经机制。行为结果上，虽然没有发现限制性饮食者在记忆抑制能力上存在显著的减弱或损伤，但是记忆提取抑制产生的奖赏贬值效应受到限制性进食的影响。具

体表现为，限制性进食程度越高，提取抑制对食物渴望度的下调效应越小。脑成像结果显示，在对食物线索进行记忆提取抑制时，限制性饮食者比非限制性饮食者的抑制控制脑区激活更强，记忆相关脑区及奖赏脑区激活更弱。功能连接分析发现，在对比食物图片的抑制和提取时，抑制控制脑区与记忆脑区和奖赏脑区的功能连接强度随着限制性进食得分的升高而减弱。进一步的分析揭示，提取抑制时 dlPFC 与丘脑的连接强度介导了记忆抑制的奖赏贬值效应随限制性进食程度的增强而减弱。

4.1 对食物线索的提取抑制效应及其大脑活动基础

我们首先验证了记忆提取抑制的提取抑制效应，即在食物线索的提取抑制中得到了抑制回忆率低于基线和提取的结果，这与经典采用中性材料的记忆提取抑制的结果一致[13, 38]，同时也验证了先前食物线索提取抑制的结果[21, 22]。此外，我们还观察到两组被试在提取抑制时均表现出前额叶(如额下回、额中回)的显著激活。前额叶，特别是 dlPFC，在记忆抑制过程中起着重要的作用[18, 19]。作为执行功能重要的脑结构基础，dlPFC 通过自上而下对记忆脑区的调节实现记忆的提取抑制效应或主动遗忘[39]。

有趣的是，我们还观察到，两组被试在抑制食物记忆时，食物奖赏脑区(如杏仁核、尾状核等)均出激活的显著减弱。与前人的研究类似，在食物特异的 Go/No-Go 任务的 No-Go > Go 的比较中发现了脑岛和额叶岛盖等奖赏脑区的激活降低[40]。这些结果表明，当抑制奖赏信息时，奖赏脑区激活也会降低，这可能是食物信息的奖赏贬值的神经机制。

4.2 食物记忆提取抑制大脑激活的组间差异

比较两组提取抑制能力的差异，行为结果上我们并没有观察到限制性饮食者在记忆提取抑制能力的下降。然而，脑成像数据结果显示，当抑制食物记忆时，高限制性饮食者比低限制性饮食者有更强的 dlPFC 的激活。一种可能的解释是，dlPFC 的高激活是一种补偿机制，即限制性饮食者需要耗费更多的努力以达到成功的记忆抑制。行为结果上两组抑制能力没有显著差异亦是对这种补偿机制的一种佐证。在前人的研究中，这一补偿机制在高记忆侵入人群的记忆提取抑制的研究中也有报道。例如，之前的一些研究也表明，在需要执行功能的任务中，抑郁症参与者的前额叶激活强于健康人群[41]。在抑郁症患者和 PTSD 患者对情绪记忆进行提取抑制时也观察到更多额叶资源的调动以有意地抑制记忆提取[42, 43]。

当抑制食物记忆时，限制性饮食者有着更低的尾状核、海马和丘脑的激活。尾状核和丘脑是与食物奖赏相关的脑区，在高奖赏敏感性个体接收食物刺激时被更高地激活。在食物决策任务中，限制性饮食者会对高热量食物有尾状核的较强的激活(Van der Laan et al., 2014)。食物线索引起肥胖者相比瘦个体的丘脑更多的激活，并且丘脑的激活水平与食物渴求正相关[44]。海马体对陈述性记忆的形成至关重要，海马体激活的增加与成功的记忆形成有关[45]。这些脑区在两组被试中的差异可能来自限制性饮食者在食物提取的过程中对记忆脑区和奖赏脑区过高的激活。

另外，dlPFC 的功能连接分析发现，限制性进食得分与海马、海马旁回、后扣带回及丘脑的连接强度呈负相关。这表明，限制性饮食倾向越高的人群，在抑制食物记忆时，dlPFC 与记忆脑区及奖赏脑区的连接强度越弱。前额叶-海马的连接作为记忆抑制过程的神经基础[18]，在高限制性饮食者中表现出了更弱的关联，这表明高限制性饮食者在对食物记忆进行抑制的过程中存在抑制缺陷。海马旁回和后扣带回是与奖赏加工有关的重要脑区。海马旁回与外显记忆有关，与食物摄

入预期相关的过程有密切关系[46]。后扣带回与食欲线索相关的价值计算有关，还涉及对内外部线索的注意，是以注意为基础的价值加工[10]。这些脑区与背外侧前额叶的连接减弱可能表明控制脑区对记忆及奖赏加工过程相关脑区的抑制缺陷。

4.3 记忆抑制对渴望度的贬值效应受限制性饮食的影响——dlPFC-丘脑功能连接的中介机制

本研究发现，在限制性饮食者中，记忆抑制对渴望度的下调量与限制性进食得分呈负相关。这表明，随限制性饮食倾向增加，记忆抑制对渴望度的下调越弱。渴望度象征着进食前个体的奖赏预期或进食欲望，尤其是在有更高的食物敏感性的个体中。饮食失调的激励敏化表明，这些个体特别容易受到渴望度的中皮质素系统的影响，可口的食物线索会触发他们对美味食物和食物摄入过度的奖赏，使他们表现为“渴望”吃。非内稳态诱发的渴望能产生寻求和消费相关奖赏的行为冲动[47]，甚至导致暴饮暴食[48]。这可能是限制性饮食者的认知特点。此外，行为刺激交互(behavior-stimulus interaction, BSI)理论对于奖赏贬值的解释是，奖赏刺激会触发强烈的趋近倾向，当刺激与抑制提示配对时，这种趋近倾向需要被抑制[49]。为了调和由动机性刺激引起的趋近倾向与抑制趋近倾向的需要之间的冲突，冲突引起的负面影响被附加到刺激上，即导致对这些刺激的评价的降低[50]。本研究的发现可能反映，本研究的发现可能反映了限制性饮食者处理食物奖赏及抑制的冲突适应的缺陷。PPI 的分析结果进一步显示，在食物记忆抑制相比于提取过程中，dlPFC 和丘脑的功能连接与限制性进食得分呈负相关。丘脑的警觉性功能是冲突适应的决定因素[51]，丘脑是行为控制的核心[52]。丘脑与前额叶的连接在调节认知控制和反应抑制中发挥着关键作用[53]。因此，这种功能连接上更弱的功能耦合可能导致了限制性饮食者对奖赏和抑制冲突的更弱的调节。另一方面，丘脑与食物线索反应密切相关。丘脑在接收食物刺激时特异性地激活[54]，并且在奖赏寻求方面起着重要作用。动物实验通过在建立条件反应后撤走强化物，发现是丘脑在戒断期间与可卡因和食物寻求过程中的重要部位[55]。dlPFC 和双侧丘脑的功能耦合也被发现可能是长期戒断期间成瘾者渴求程度变化的潜在神经影像学标记[56]。可见丘脑起着奖赏寻求的作用。因此，dlPFC 和丘脑的功能连接的降低也可能表示抑制控制区域对奖赏更低效的抑制。这一功能连接介导了限制性进食与抑制记忆的渴望度下调的相关性显示，dlPFC 和丘脑的功能连接可能是限制性饮食者对奖赏和抑制的冲突进行适应或对奖赏进行调控的神经机制。低限制性饮食者可以通过对这一冲突较为有效的处理，从而对奖赏信息进行贬值；而高限制性饮食者难以完成这一操作，在对食物信息进行提取抑制时表现出了更低的奖赏下调和更弱的 dlPFC 和丘脑的功能连接。

本研究对限制性饮食者的记忆提取抑制能力及奖赏贬值效应进行探究，限制性饮食者对食物奖赏表现出更弱的抑制以及和神经表现的关联提供了限制性饮食者暴饮暴食的可能解释。此外，食物提取抑制可能可以作为调节饮食失调高风险个体饮食失调模式的一种手段，通过关于记忆提取抑制如何与环境线索相互作用以及如何训练记忆提取抑制的能力可能会对以刺激驱动行为或认知的控制问题为特征的各种心理障碍产生影响，尤其在食物刺激下过度激活和不足的反应抑制为代表的疾病，例如神经性厌食症的厌食反应和神经性贪食症中的暴饮暴食等。另外，本研究也存在一些不足。本研究的参与者均为健康大学生。在年龄上，执行功能处于整个年龄段的高峰阶段，因此可能出现天花板效应。另外，目前的研究尽管在短时间内对食物记忆有着抑制作用，但是尚不清楚这种作用的持续时间

以及要产生长期性的改变的训练量。对于我们所测量的特定食物的效应是否可以泛化到类似的高热量食物中，也尚未可知。后续的实验可以针对这些问题进行进一步研究。

5 结论

本研究采用 Think/No-Think 范式，探究了限制性饮食者对食物线索的记忆抑制及其贬值效应，并试图揭示其大脑活动基础。结果表明，限制性饮食者和非限制性饮食者在提取抑制的记忆行为表现上没有差异，但是限制性饮食者在记忆抑制过程中产生了更强的 dlPFC 激活，这意味着限制性饮食者需要更多认知努力对食物记忆进行抑制。PPI 分析发现限制性进食得分与海马、海马旁回、后扣带回及丘脑的连接强度呈负相关，表明限制性进食程度越高，控制脑区与记忆及奖赏加工过程相关脑区的功能连接越弱。此外，限制性进食得分越高，记忆抑制对食物奖赏渴求度的贬值效应随限制性饮食程度的增加而降低，并且 dlPFC 和丘脑的功能连接介导了这一过程，即高限制性饮食者在对食物信息进行提取抑制时表现出了更低的奖赏下调和更弱的 dlPFC 和丘脑的功能连接。

本研究结果从抑制控制的角度支持目标冲突模型，即限制性饮食者之所以节食失败，可能原因是他们需要动用更多的认知资源以抑制与食物和食欲关联的想法和渴望；同时，难以在体重控制目标(即抑制食欲)与享受美食目标(即奖赏产生的冲动)的冲突中对食物奖赏进行下调。这种因为记忆抑制能力降低甚至缺陷而导致的在奖赏贬值中的更弱表现，增加了限制性饮食者在食物丰富环境中产生过度进食的风险。总而言之，他们更难抵抗美味食物的诱惑。

参考文献：

[1]. Herman, C.P. and J. Polivy, *Restrained Eating.* Obesity, 1980: p. 208-225.

[2]. Stroebe, W., et al., *Why dieters fail: Testing the goal conflict model of eating.* Journal of Experimental Social Psychology, 2008. **44**(1): p. 26-36.

[3]. Pelaez-Fernandez, M.A. and N. Extremera, *The control dilemma in eating behavior: Influence of temptation cues in restrained versus unrestrained eaters.* Psicothema, 2011. **23**: p. 587-92.

[4]. Demos, K.E., W.M. Kelley, and T.F. Heatherton, *Dietary restraint violations influence reward responses in nucleus accumbens and amygdala.* J Cogn Neurosci, 2011. **23**(8): p. 1952-63.

[5]. Stein, R.I., et al., *What's driving the binge in binge eating disorder?: A prospective examination of precursors and consequences.* Int J Eat Disord, 2007. **40**(3): p. 195-203.

[6]. Bartholdy, S., et al., *A systematic review of the relationship between eating, weight and inhibitory control using the stop signal task.* Neurosci Biobehav Rev, 2016. **64**: p. 35-62.

[7]. Meule, A., et al., *Enhanced behavioral inhibition in restrained eaters.* Eating Behaviors, 2011. **12**(2): p. 152-155.

[8]. Dong, D., et al., *Altered regional homogeneity and efficient response inhibition in restrained eaters.* Neuroscience, 2014. **266**: p. 116-26.

[9]. Zhou, Y., et al., *Effects of food exposure on food-related inhibitory control in restrained eaters: An ERP study.* Neurosci Lett, 2018. **672**: p. 130-135.

[10]. Chen, S., et al., *Altered frontal inter-hemispheric resting state functional*

connectivity is associated with bulimic symptoms among restrained eaters. Neuropsychologia, 2016. **81**: p. 22-30.

[11]. Soetens, B. and C. Braet, *'The weight of a thought': food-related thought suppression in obese and normal-weight youngsters.* Appetite, 2006. **46**(3): p. 309-17.

[12]. Martin, A.A. and T.L. Davidson, *Human cognitive function and the obesogenic environment.* Physiology & behavior, 2014. **136**: p. 185-193.

[13]. Anderson, M.C. and C. Green, *Suppressing unwanted memories by executive control.* Nature, 2001. **410**(6826): p. 366-9.

[14]. Levy, B.J. and M.C. Anderson, *Individual differences in the suppression of unwanted memories: the executive deficit hypothesis.* Acta Psychologica, 2008. **127**(3): p. 623-35.

[15]. Anderson, M.C. and E. Huddleston, *Towards a cognitive and neurobiological model of motivated forgetting.* Nebr Symp Motiv, 2012. **58**: p. 53-120.

[16]. Benoit, R.G., et al., *Adaptive top-down suppression of hippocampal activity and the purging of intrusive memories from consciousness.* J Cogn Neurosci, 2015. **27**(1): p. 96-111.

[17]. Anderson, M.C. and J.C. Hulbert, *Active Forgetting: Adaptation of Memory by Prefrontal Control.* Annual Review of Psychology, 2021. **72**(1): p. 1-36.

[18]. Anderson, M.C., et al., *Neural systems underlying the suppression of unwanted memories.* Science, 2004. **303**(5655): p. 232-5.

[19]. Benoit, R.G. and M.C. Anderson, *Opposing mechanisms support the voluntary forgetting of unwanted memories.* Neuron, 2012. **76**(2): p. 450-60.

[20]. Gagnepain, P., J. Hulbert, and M.C. Anderson, *Parallel Regulation of Memory and Emotion Supports the Suppression of Intrusive Memories.* J Neurosci, 2017. **37**(27): p. 6423-6441.

[21]. Ao, H., *The effects of memory retrieval suppression on food reward processing (Unpublished master's thesis).* 2021, Southwest University, China.

[22]. Zhang, R., et al., *Wanting to eat matters: Negative affect and emotional eating were associated with impaired memory suppression of food cues.* Appetite, 2020. **150**: p. 104660.

[23]. Bian, Z., et al., *Influence of negative mood on restrained eaters' memory suppression of food cues: An event-related potentials study.* Appetite, 2021. **164**: p. 105269.

[24]. Yang, Y., et al., *Food-Specific Inhibition Training for Food Devaluation: A Meta-Analysis.* Nutrients, 2022. **14**(7).

[25]. Chen, Z., et al., *How does not responding to appetitive stimuli cause devaluation: Evaluative conditioning or response inhibition?* Journal of Experimental Psychology: General, 2016. **145**(12): p. 1687-1701.

[26]. Houben, K. and A. Jansen, *Training inhibitory control. A recipe for resisting sweet temptations.* Appetite, 2011. **56**(2): p. 345-9.

[27]. Houben, K. and A. Jansen, *Chocolate equals stop. Chocolate-specific inhibition training reduces chocolate intake and go associations with chocolate.* Appetite, 2015. **87**: p. 318-23.

[28]. Lawrence, N.S., et al., *Stopping to food can reduce intake. Effects of stimulus-specificity and individual differences in dietary restraint.* Appetite, 2015. **85**: p. 91-103.

[29]. Liu, Y., et al., *Reducing unsuccessful restrained eaters' unhealthy food choice: An internet-based inhibition control training.* Acta Psychologica Sinica, 2017. **49**(2): p. 219-227.

[30]. Weinbach, N., et al., *The Influence of Response Inhibition Training on Food Consumption and Implicit Attitudes toward Food among Female Restrained Eaters.* Nutrients, 2020. **12**.

[31]. Blechert, J., et al., *Food-pics: an image database for experimental research on eating and appetite.* Front Psychol, 2014. **5**: p. 617.

[32]. Li, X., *Establishment and Application In Dieting Psychology of Chinese Food Image Library* 2018, Southwest University.

[33]. Strien, T., et al., *The dutch eating behavior questionnaire (DEBQ) for assessment of restrained, emotional, and external eating behavior.* International Journal of Eating Disorder, 1986. **5**: p. 295-315.

[34]. Anderson, M.C. and S.B. Floresco, *Prefrontal-hippocampal interactions supporting the extinction of emotional memories: the retrieval stopping model.* Neuropsychopharmacology, 2021. **47**(1): p. 180-195.

[35]. Tang, D.W., et al., *Food and drug cues activate similar brain regions: a meta-analysis of functional MRI studies.* Physiol Behav, 2012. **106**(3): p. 317-24.

[36]. Friston, K.J., et al., *Psychophysiological and modulatory interactions in neuroimaging.* Neuroimage, 1997. **6**(3): p. 218-29.

[37]. Hayes, A.F., *Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-Based Approach. New York, NY: The Guilford Press.* Journal of Educational Measurement, 2013. **51**.

[38]. Levy, B.J. and M.C. Anderson, *Individual differences in the suppression of unwanted memories: the executive deficit hypothesis.* Acta Psychol (Amst), 2008. **127**(3): p. 623-35.

[39]. Gagnepain, P., R.N. Henson, and M.C. Anderson, *Suppressing unwanted memories reduces their unconscious influence via targeted cortical inhibition.* Proc Natl Acad Sci U S A, 2014. **111**(13): p. E1310-9.

[40]. Batterink, L., S. Yokum, and E. Stice, *Body mass correlates inversely with inhibitory control in response to food among adolescent girls: an fMRI study.* NeuroImage, 2010. **52**(4): p. 1696-1703.

[41]. Diener, C., et al., *A meta-analysis of neurofunctional imaging studies of emotion and cognition in major depression.* Neuroimage, 2012. **61**(3): p. 677-85.

[42]. Yang, W., et al., *Behavioral and neural correlates of memory suppression in subthreshold depression.* Psychiatry Res Neuroimaging, 2020. **297**: p. 111030.

[43]. Steward, T., et al., *Dysfunctional coupling of the parahippocampal cortex and inferior frontal gyrus during memory suppression in posttraumatic stress disorder.* Eur Neuropsychopharmacol, 2020. **41**: p. 146-151.

[44]. Potenza, M.N., *Obesity, food, and addiction: emerging neuroscience and clinical and public health implications.* Neuropsychopharmacology : official publication of the American College of Neuropsychopharmacology, 2014. **39**(1): p. 249-250.

[45]. Davachi, L., J.P. Mitchell, and A.D. Wagner, *Multiple routes to memory: Distinct medial temporal lobe processes build item and source memories.* Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003. **100**: p. 2157 - 2162.

[46]. Stice, E., K. Burger, and S. Yokum, *Caloric deprivation increases responsivity of attention and reward brain regions to intake, anticipated intake, and images of palatable foods.* Neuroimage, 2013. **67**: p. 322-30.

[47]. Berridge, K.C., *Evolving Concepts of Emotion and Motivation.* Frontiers in psychology, 2018. **9**: p. 1647-1647.

[48]. de Araujo, I.E., M. Schatzker, and D.M. Small, *Rethinking Food Reward.* Annu Rev Psychol, 2020. **71**: p. 139-164.

[49]. Chen, Z., et al., *How does not responding to appetitive stimuli cause devaluation: Evaluative conditioning or response inhibition?* J Exp Psychol Gen, 2016. **145**(12): p. 1687-1701.

[50]. Quandt, J., et al., *The role of attention in explaining the no-go devaluation effect: Effects on appetitive food items.* Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance, 2019.

[51]. Wang, X., et al., *Alertness function of thalamus in conflict adaptation.* NeuroImage, 2016. **132**: p. 274-282.

[52]. Choi, E.A., et al., *Paraventricular Thalamus Controls Behavior during Motivational Conflict.* The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience, 2019. **39**(25): p. 4945-4958.

[53]. Huang, A.S., et al., *The thalamus in drug addiction: from rodents to humans.* Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2018. **373**(1742).

[54]. Schur, E.A., et al., *Activation in brain energy regulation and reward centers by food cues varies with choice of visual stimulus.* Int J Obes (Lond), 2009. **33**(6): p. 653-61.

[55]. Matzeu, A., et al., *The paraventricular nucleus of the thalamus is differentially recruited by stimuli conditioned to the availability of cocaine versus palatable food.* Addiction biology, 2017. **22**(1): p. 70-77.

[56]. Liu, S., et al., *Brain responses to drug cues predict craving changes in abstinent heroin users: A preliminary study.* Neuroimage, 2021. **237**: p. 118169.

作者贡献声明 ：

邹雨晴，敖华：提出研究思路，设计研究方案；

邹雨晴，梁蓉芳，高源：进行实验；

邹雨晴，沈佳雯：采集、清洗和分析数据；

邹雨晴：论文起草；

邹雨晴，高笑：论文最终版本修订。